

基于 FMECA 法的城市轨道交通车辆故障重要度分析

王旭岩¹ 樊茜琪^{2*}

(1. 长春轨道交通集团有限公司, 130022, 长春; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

摘要 运用 FMECA(故障模式影响及危害性分析)法对城市轨道交通车辆故障重要度进行分析, 定量计算车辆各故障模式的重要度, 识别关键故障影响, 为制定科学有效的车辆各系统维修大纲提供支撑。运用该方法对长春轻轨车辆的转向架系统和制动系统的故障进行分析。结果表明: 转向架系统中, 重要度排前三的故障模式为支架出现裂纹、高度阀出现卡簧松脱或球阀卡滞、抗侧滚扭力臂出现关节脱出或裂纹超标; 制动系统中, 重要度排前三的故障模式为撒沙系统故障、制动单元故障、制动夹钳故障。因此, 在制定车辆日常维修大纲时需重点关注重要度排前三的故障模式。

关键词 城市轨道交通; 转向架; 制动系统; 故障重要度

中图分类号 U279.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.025

Fault Importance Analysis of Urban Rail Transit Vehicle Based on FMECA Method

WANG Xuyan, FAN Qianqi

Abstract The importance of urban rail vehicle fault is analyzed with FMECA (failure mode, effects and criticality analysis) method, through quantitative calculation of the importance of each vehicle fault mode, the impact of critical faults is recognized, which provides support to develop scientific and effective maintenance outline for vehicle systems. The method is applied to analyze the light rail vehicle bogie and braking system faults in Changchun City, and the results show that the top three important faults of the bogie system are the stent crack in bracket, the caliper looseness or ball valve stuck in the height valve, the disengagement or standard-exceeding cracks in anti-roll torsion arm. While the top three important faults of the braking system are sanding system failure, brake unit failure and brake clamp failure. Therefore, the top three important fault modes should be concerned with emphasized attention in the development of daily maintenance outline.

Key words urban rail transit; bogie; braking system; fault importance

First-author's address Changchun Rail Transit Group Co., Ltd., 130022, Changchun, China

车辆安全是城市轨道交通运营安全的重中之重。车辆故障多种多样, 按其各子系统的组成可将故障主要分为轮对故障、制动故障、空簧系统故障、转向架系统故障、车门系统故障等。采用合适的故障分析方法对降低车辆系统故障率至关重要。本文将利用 FMECA(故障模式影响及危害性分析)法对长春轻轨车辆的转向架系统、制动系统进行故障分析。

1 FMECA 法

1.1 FMECA 法简介

FMECA 法, 是以故障模式为基础, 以故障影响或结果为分析手段, 通过无数工程人员的项目实践总结出来的科学分析法^[1]。其目的是找到一种全面、系统的故障分析方法, 并将此方法标准化、格式化、程序化^[2]。FMECA 法是按照给定的方法和流程对分析对象的子系统及组成部分进行逐一分析, 或者对分析对象的制作工艺、检修方法、检修流程进行系统分析, 得到所有可能产生的故障模式, 并且进一步明确各故障模式对系统安全、性能等方面的影响程度; 同时结合相应故障的发生概率以定量方式得出其危害性, 找到起关键作用的部件故障源; 最终采取有效措施降低甚至消除因故障导致的不利影响。此方法也被称为归纳分析法^[3]。

1.2 算法步骤

FMECA 包含了故障模式和影响分析(FMEA)以及危害性分析(CA)两部分, 具体的算法步骤如图 1 所示。其中故障模式和影响分析分别包括: 明确对象, 确定所分析部件的功能, 所有存在的故障模式分析, 确定分析方法及补偿措施。

危害性分析中的危害度 C_{ij} 计算公式:

$$C_{ij} = \alpha_{ij} \beta_{ij} \lambda_i t \quad (1)$$

式中:

α_{ij} ——部件 i 以故障模式 j 发生的频数比;

* 通信作者

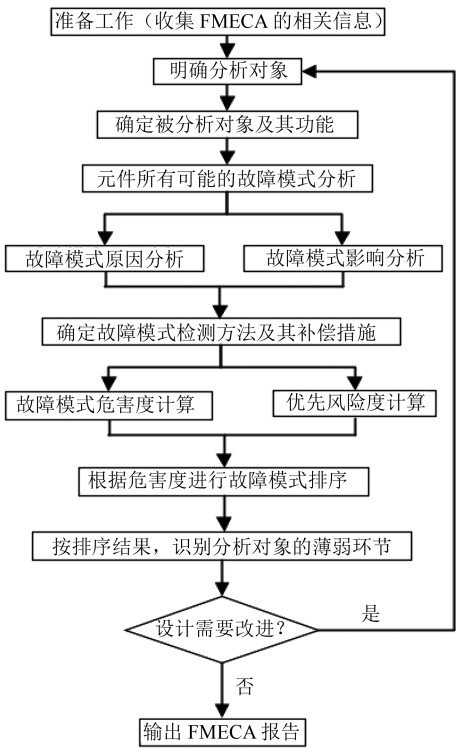


图1 FMECA 分析流程

β_{ij} ——部件*i*以发生第*j*种故障模式时故障影响的概率,不同故障对应的影响概率见表1;
 λ_i ——部件*i*的故障率;
t——工作时间。

故障等级评定从年均发生次数和事件后果严重度2个方面进行。当故障年均发生次数过多时,不仅影响乘客的出行计划,也会提高运营公司保障线路正常运营的人力物力成本^[4]。经过专家多年实践,可将5年内的年均故障次数作为年均发生次

数的评判标准。年均发生次数评定标准见表2。

表1 故障影响概率 β_{ij} 的推荐值

描述	β_{ij} 取值
部件肯定发生故障,丧失功能	1.0
部件可能发生故障,丧失功能	0.5
部件很少发生故障,丧失功能	0.1
部件几乎不发生故障	0

表2 年均发生次数评定标准

年均发生次数/次	评定标准	分数
>25	频繁发生	10
10<·≤25	经常发生	8≤·≤9
5<·≤10	有时发生	6≤·≤7
1<·≤5	偶尔发生	4≤·≤5
1/5<·≤1	极少发生	2≤·≤3
≤1/5	基本不发生	1

事件后果严重度可从线路运营安全评价的角度,从运营表现、设备损坏及可修复程度、人员伤亡3方面进行判定。评分采用这3个方面的或集,选取影响最为严重的指标作为事件后果严重度的评分标准。事件后果严重度评定标准见表3。

表3 事件后果严重度评定标准

人员伤亡	设备损坏	运营表现	分值
无伤亡	基本无损坏	中断5 min 以下	1≤·≤2
无伤亡	轻微受损,易修复	中断5~15 min	3≤·≤4
无伤亡	少量受损,可修复	中断15~30 min	5≤·≤6
轻伤	较多受损,难修复	中断30~60 min	7≤·≤8
有伤亡	严重受损,需更换	中断60 min 以上	9≤·≤10

年均发生次数和事件后果严重度均需通过历史故障情况统计分析得出,所得分值的乘积就可以作为故障评定的依据。按照所得乘积分值,将故障风险等级及故障严重度划分为五级(见表4)。

表4 故障风险等级划分表

故障风险等级	事件后果严重度	评估分值	描述	控制对策
I 级	灾难性的	91≤·≤100	不容许的;设备已达到危险状态,极有可能造成人员伤亡、设备损毁等灾难性后果	必须立即整改,直到风险得到有效控制,安全得到切实保障
II 级	重大的	76≤·≤90	极高风险;设备接近临界状态,可能造成人员伤亡、设备损坏或大面积运营延误	必须采取风险预防措施,控制风险源和影响范围,制定风险应急预案
III 级	较大的	61≤·≤75	高度风险;明显存在人员或设备安全隐患,影响运营	应采取有效的风险防范、控制措施和安全保障措施
IV 级	一般的	46≤·≤60	中度风险;可能危及人员或设备安全	需加强风险防范和安全保障措施
V 级	较小的	0≤·≤45	可接受的;无人员或重要设备安全风险,影响运营时间较短	维持现有的风险防控措施

2 危害性矩阵与故障重要度量化

故障模式危害性矩阵是在某个特定的风险等级类别下,对每一个故障模式危害程度结果进行比较,以指明风险优先顺序。以危害度*C*为*y*轴和故障风险等级为*x*轴的故障模式危害性矩阵如图2。

故障模式的重要度则指该故障模式在其系统层次中对该系统总体运行表现的综合影响,表示风险优先顺序。在故障模式危害性矩阵图中,从故障模式分布点到矩阵对角线做垂线,将垂线与矩阵对角线的交点距坐标原点的距离作为衡量故障模式重要度的依据。该距离越长表示故障模式的重要度越

高。由图 2 可知,故障模式的重要度与危害度和故障风等级相互关联。危害度高并不代表重要度高,但两者相辅相成,维修人员在制定维修大纲时需同时考虑这两方面。

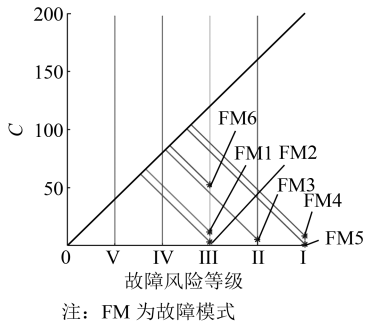


图 2 某系统的故障风险等级与危害度矩阵图

图 2 虽可直观地看出各故障模式的重要度,但只是定性表示,因此需对故障模式的重要度进行量化处理。

为了得到各个故障模式的重要度,需要对每一个故障模式进行数量化和归一化。由于各系统部件故障模式的危害度存在差异性,因此需要对危害度进行归一化处理,使 C 分布在 $(0,1)$ 范围内得到 C^* 。同时,对故障风险等级进行处理,故障危害度归一化后的值 m 为:

$$m = -0.2h + 1.2 \tag{2}$$

式中:

h ——故障风险等级,即 $h=1,2,3,4,5$ 。

由式(2)计算得到: $m_I = 1.0, m_{II} = 0.8, m_{III} = 0.6, m_{IV} = 0.4, m_V = 0.2$ 。

分别以 C^* 和 m 为 y 轴、 x 轴形成故障模式危害性矩阵图,从故障模式分布点到矩阵对角线做垂线,垂线与矩阵对角线交点的坐标有如下关系:

$$\begin{cases} y = x \\ y = -x + A \end{cases} \tag{3}$$

式中:

A ——归一化后过某一故障模式分布点的垂线的综合偏移量, $x=A/2$ 。

将归一化后的故障模式分布点 (m, C^*) 代入式(3)可得交点坐标:

$$x = y = \frac{C^* + m}{2} \tag{4}$$

交点坐标到原点的距离,即重要度 ω 为:

$$\omega = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{5}$$

再将该重要度归一化为 ω^* :

$$\omega^* = \frac{\omega}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{2}} = \frac{C^* + m}{2} = \frac{C^* - 0.2h + 1.2}{2} \tag{6}$$

3 案例分析

3.1 车辆故障分析

车辆的承载能力主要体现在转向架系统的状态上,不同的转向架可支撑的车辆的长度和容积不同,从而整车的承载量也不同。转向架会因轴数、轮对支撑方式、弹簧悬挂系统等方面的不同存在差异性,但大致是由轮对、构架、悬挂系统、抗侧滚扭杆、中央牵引单元、轮缘润滑系统和辅助装置等部件组成^[5]。车辆转向架常见的故障主要有轴承故障、构架裂纹、管理及维修工作疏忽导致的故障^[6]。

制动系统是车辆安全起停和紧急制动的重要保障系统,主要由制动单元、制动管路、撒沙系统、制动夹钳等组成。常见的故障有制动控制单元故障、制动夹钳抱死、撒沙故障、散热风机故障等。

3.2 危害度分析

本文以长春轻轨车辆转向架系统和制动系统近几年的故障数据为例,计算得出转向架系统的 FMECA 表和制动系统的 FMECA 表(见表 5、表 6)。

3.3 重要度分析

对所采集的长春轻轨车辆转向架系统数据进行归一化处理,并根据式 3 进行计算。由计算结果表 7 可见,重要度排在前三位的故障模式是组件 ATC 支架出现裂纹、高度阀卡簧松脱或球阀卡滞

表 5 长春轻轨车辆的转向架系统 FMECA 表

故障模式编号	组件	故障模式	故障风险等级	故障模式频数比	故障影响概率	工作时间/(万 h)	故障率/(次/(万 h))	危害度
FM1	轮对	踏面擦伤和剥离	III	1	0.5	2.628	5.64	7.41
FM2	接地碳刷	线耳松脱、线缆断裂	III	1	1.0	2.628	0.76	1.99
FM3	叠层弹簧	橡胶裂纹	II	1	0.5	2.628	2.45	3.21
FM4	ATC(列车自动控制)支架	支架裂纹	I	1	0.5	2.628	3.95	5.19
FM5	高度阀	卡簧松脱、球阀卡滞留	I	1	0.5	2.628	0.56	0.74
FM6	抗侧滚扭力臂	关节脱出、关节裂纹超标	III	1	1.0	2.628	12.40	32.60

表 6 长春轻轨车辆的制动系统 FMECA 表

故障模式 编号	组件	故障模式	故障风险 等级	故障模式 频数比	故障影响 概率	工作时间/ (万 h)	故障率/ (次/(万 h))	危害度
FM1	安全制动按钮	接线松动、脱落	III	1	1.0	2.628	0.76	2.00
FM2	撒沙系统	撒沙功能故障、撒沙管刮物、撒沙管松动、撒沙管脱落、沙箱传感器故障、沙箱缺沙	II	1	1.0	2.628	27.02	71.00
FM3	散热风机	散热风机保护、散热风机故障、散热风机烧损	III	1	0.5	2.628	2.66	3.50
FM4	压力开关	调节不到位	IV	1	1.0	2.628	0.76	2.00
FM5	制动单元	制动单元故障	II	1	1.0	2.628	12.94	34.00
FM6	制动管路	堵塞、三通密封胶圈垫故障	IV	1	1.0	2.628	0.38	1.00
FM7	制动回路	空开跳起	III	1	0.5	2.628	0.76	1.00
FM8	制动夹钳	制动夹钳抱死、制动夹钳零件脱落	II	1	1.0	2.628	1.14	3.00

及抗侧滚扭力臂关节脱出或裂纹。因此,在编制车辆转向架系统检修大纲时需着重关注上述三种情况。同样,对所采集的长春轻轨车辆制动系统数据进行计算。由计算结果表 8 可见,重要度排在前三位的故障模式是撒沙系统、制动单元及制动夹钳的故障。因此,在编制车辆制动系统检修大纲时,需重点关注撒沙系统撒沙管位置及固定情况、沙箱内沙量,以及制动单元故障,制动夹钳抱死等三种情况。

表 7 长春轻轨车辆转向架系统故障重要度

故障模式 编号	部件	故障模式	故障风险 等级	危害 度	重要 度
FM1	轮对	踏面擦伤、剥离	0.6	0.07	0.34
FM2	接地碳刷	线耳松脱、 线缆断裂	0.6	0.02	0.31
FM3	叠层弹簧	橡胶裂纹	0.8	0.03	0.42
FM4	ATC 支架	支架裂纹	1.0	0.05	0.53
FM5	高度阀	卡簧松脱、 球阀卡滞留	1.0	0.01	0.50
FM6	抗侧滚扭力臂	关节脱出、 关节裂纹超标	0.6	0.33	0.46

表 8 长春轻轨车辆制动系统故障重要度

故障模式编号	部件	故障模式	故障风险等级	危害度	重要度
FM1	安全制动按钮	接线松动、脱落	0.60	0.02	0.31
FM2	撒沙系统	撒沙功能故障、撒沙管刮物、撒沙管松动、撒沙管脱落、沙箱传感器故障、沙箱缺沙	0.80	0.71	0.76
FM3	散热风机	散热风机保护、散热风机故障、散热风机烧损	0.60	0.04	0.32
FM4	压力开关	调节不到位	0.40	0.02	0.21
FM5	制动单元	制动单元故障	0.80	0.34	0.57
FM6	制动管路	堵塞、三通密封胶圈垫故障	0.40	0.01	0.21
FM7	制动回路	空开跳起	0.60	0.01	0.31
FM8	制动夹钳	制动夹钳抱死、制动夹钳零件脱落	0.80	0.03	0.42

4 结论

- 1) 对车辆转向架系统出现的故障模式进行分析,重要度排前三位的故障模式是 ATC 支架出现裂纹、高度阀卡簧松脱或球阀卡滞、抗侧滚扭力臂关节脱出或裂纹超标。
- 2) 对车辆制动系统出现的故障模式进行分析,重要度排前三位的故障模式是撒沙系统故障、制动单元故障、制动夹钳故障。
- 3) 在编订转向架系统和制动系统检修大纲时,需要重点关注结论 1)和 2)中重要度排前三位的故障模式。
- 4) 采用 FMECA 法与故障模式重要度的量化法,会大大提高车辆各系统检修大纲的合理性,同时可有效降低维修成本,提升运行可靠性。

参考文献

[1] 李智斌.基于改进 FMECA 方法的弹簧全启式安全阀可靠性分析[D].杭州:浙江工业大学,2012.

[2] ZAFIROPOULOS E P, DIALYNAS E N. Reliability prediction and failure mode effects and criticality analysis(FMECA) of e-lectronic devices using fuzzy logic[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005(2): 183.

[3] 陈颖,康锐.FMECA 技术及其应用[M].北京:国防工业出版社,2014.

[4] 王贵国,张荧驿,谈立成,等.轨道车辆 RAMS 工程技术体系研究[J].北京交通大学学报,2014(2): 130.

[5] 彭大鹏,郭和平.关于地铁车辆转向架的故障检修分析[J].山东工业技术,2017(14): 281.

[6] 沈涛.城市轨道交通车辆转向架故障维修探析[J].科技资讯, 2018(19): 91.

(收稿日期:2020-02-12)